

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 05-075194

(43)Date of publication of application : 26.03.1993

(51)Int.Cl.

H01S 3/098

H01S 3/07

H01S 3/083

H01S 3/094

(21)Application number : 03-235143

(71)Applicant : NIPPON TELEGR & TELEPH CORP
<NTT>

(22)Date of filing : 13.09.1991

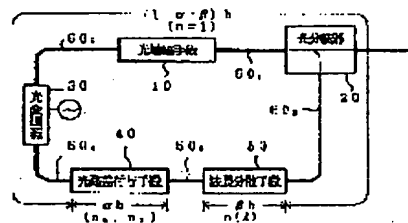
(72)Inventor : SARUWATARI MASATOSHI
KAWANISHI SATOKI
TAKARA HIDEHIKO
JIYON SHIYURATSUGAA

(54) WAVELENGTH MULTIMODE SYNCHRONOUS LASER EQUIPMENT

(57)Abstract:

PURPOSE: To realize a new type of laser equipment which generates trains of multiwavelength high-speed light pulses of full agreement in repetition by adding an optical path difference application means and a wavelength dispersion means under a predetermined condition to a mode synchronous laser constituted physically of one resonator.

CONSTITUTION: An optical amplification means 10, an optical modulator 30, an optical difference application means 40, and a wavelength dispersion means 50 are optically coupled in a ring form via optical coupling means 601-605 to constitute a ring resonator having a predetermined optical path length. An optical divider 20 is inserted between the optical coupling means 601 and the optical coupling means 602 to extract light pulses outside the resonator. Hereupon, the optical path difference application means 40 forms a plurality of different optical path lengths from the same wavelength by a birefringence which gives different refractive indices with mutually orthogonal polarization directions (TE polarization and TM polarization), and the optical path lengths are so set as to be equal in different wavelengths by the wavelength dispersion means 50, so that a plurality of different wavelengths may satisfy resonance frequency conditions of mode synchronization.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 09.12.1994

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the
examiner's decision of rejection or application
converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 2579394

[Date of registration] 07.11.1996

[Number of appeal against examiner's decision of
rejection][Date of requesting appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998.2000 Japan Patent Office

(11)特許出願公開番号

特開平 5-75194

(43)公開日 平成5年(1993)3月26日

(51)Int. Cl. ⁵	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
H O I S	3/098	8934- 4 M		
	3/07	8934- 4 M		
	3/083	8934- 4 M		
	3/094			
		8934- 4 M	H O I S	3/094 S
審査請求	未請求	請求項の数 1 0		(全 1 7 頁)

(21)出願番号 特願平3-235143

(22)出願日 平成3年(1991)9月13日

(71)出願人 000004226
日本電信電話株式会社
東京都千代田区内幸町一丁目1番6号

(72)発明者 猿渡 正俊
東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日本
電信電話株式会社内

(72)発明者 川西 悟基
東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日本
電信電話株式会社内

(72)発明者 高良 秀彦
東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日本
電信電話株式会社内

(74)代理人 弁理士 古谷 史旺

[最終頁に続く](#)

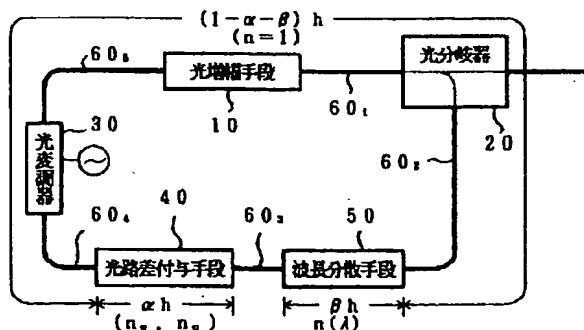
(54)【発明の名称】波長多重型モード同期レーザ装置

(57) 【要約】

【目的】 本発明は、複数の波長で高速の光パルス列を同時に発生させる波長多重型モード同期レーザ装置に関し、新しい原理に基づき、構成および光ファイバとの結合が極めて簡単であるとともに発振波長の制御も可能とした上で、複数の波長で高速の光パルス列を同時に発生させることができることを目的とする。

【構成】 リング共振器型モード同期レーザ装置あるいはファブリペロ型モード同期レーザ装置において、リング共振器内あるいはファブリペロ型共振器内に、互いに直交する偏光方向によって異なる屈折率を与え、各屈折率に応じて形成される複数の光路長に対応した共振器を構成する光路差付与手段と、波長によって異なる屈折率を与える波長分散手段とを備えたことを特徴とする。

請求項 1 に記載の波長多重型モード同期レーザー装置の実施例構成図



【特許請求の範囲】

【請求項1】 光の損失あるいは位相を所定の周波数で変調する光変調手段と、

変調された光パルスを増幅する光増幅手段と、

前記光パルスを外部に取り出す光分岐手段と、

前記各手段を互いに光学的に結合し、所定の長さのリング状の光路を有するリング共振器を形成する光結合手段とを備えたリング共振器型モード同期レーザ装置において、

前記リング共振器内に、

互いに直交する偏光方向によって異なる屈折率を与え、各屈折率に応じて形成される複数の光路長に対応した共振器を構成する光路差付手段と、

波長によって異なる屈折率を与える波長分散手段とを備えたことを特徴とする波長多重型モード同期レーザ装置。

【請求項2】 光の損失あるいは位相を所定の周波数で変調する光変調手段と、

変調された光パルスを増幅する光増幅手段と、

入射光の大部分を反射させる2つの光反射手段と、

前記2つの光反射手段を両端に配置し、その間に前記光変調手段および光増幅手段を配置して光学的に結合し、所定の長さの往復光路を有するファブリペロ型共振器を形成する光結合手段とを備えたファブリペロ型モード同期レーザ装置において、

前記ファブリペロ型共振器内に、

互いに直交する偏光方向によって異なる屈折率を与え、各屈折率に応じて形成される複数の光路長に対応した共振器を構成する光路差付手段と、

波長によって異なる屈折率を与える波長分散手段とを備えたことを特徴とする波長多重型モード同期レーザ装置。

【請求項3】 請求項1または請求項2に記載の波長多重型モード同期レーザ装置において、

光路差付手段で各屈折率に応じて形成される複数の光路長 $L_1 \sim L_k$ (k は2以上の整数)と、光増幅手段の利得スペクトル幅に入る複数の波長 $\lambda_1 \sim \lambda_m$ (m は2以上 k 以下の整数)との間で、波長 λ_i における i 番目の光路長を $L_i(\lambda_i)$ としたときに、波長分散手段によって異なる波長における光路長が等しくなる条件である $L_i(\lambda_i) = L_2(\lambda_2) = \dots = L_m(\lambda_m)$ を満たす構成であることを特徴とする波長多重型モード同期レーザ装置。

【請求項4】 請求項3に記載の波長多重型モード同期レーザ装置において、

$L_1(\lambda_1) = L_2(\lambda_2) = \dots = L_m(\lambda_m)$ を満たす m 個の共振器は、対応する光路長における光増幅手段の利得とそれぞれの共振器損失との差である共振器利得がそれぞれ1より大きく、かつそれぞれが等しい構成であることを特徴とする波長多重型モード同期レーザ装置。

【請求項5】 請求項3に記載の波長多重型モード同期

レーザ装置において、

$L_1(\lambda_1) = L_2(\lambda_2) = \dots = L_m(\lambda_m)$ を満たす波長 $\lambda_1 \sim \lambda_m$ は、互いの波長差が光パルスが有するスペクトル幅よりも大きい構成であることを特徴とする波長多重型モード同期レーザ装置。

【請求項6】 請求項1または請求項2に記載の波長多重型モード同期レーザ装置において、

光路差付手段は、少なくとも1つの複屈折光ファイバあるいは複屈折結晶から構成される複屈折媒質を含むことを特徴とする波長多重型モード同期レーザ装置。

【請求項7】 請求項1または請求項2に記載の波長多重型モード同期レーザ装置において、

光路差付手段は、複屈折光ファイバあるいは複屈折結晶から構成される複屈折媒質を複数 N 個含み、その中の $(N-p)$ 個 (p は1以上 $(N-1)$ 以下の整数)の複屈折媒質の光学軸の方向を互いに一致あるいは直交して配置し、他の p 個の複屈折媒質の光学軸の方向を $(N-p)$ 個の複屈折媒質の光学軸に対して45度をなすように配置することを特徴とする波長多重型モード同期レーザ装置。

【請求項8】 請求項1または請求項2に記載の波長多重型モード同期レーザ装置において、

光路差付手段は、光増幅手段、波長分散手段、光結合手段のそれぞれに含まれる複屈折媒質の少なくとも1つを含む構成であることを特徴とする波長多重型モード同期レーザ装置。

【請求項9】 請求項1に記載の波長多重型モード同期レーザ装置において、

波長分散手段は、所定の波長で零分散を示す単一モード光ファイバであるとともに、光結合手段、光増幅手段、光分岐手段、光路差付手段のそれぞれに含まれる波長分散特性を有する媒質の少なくとも一部を含む構成であることを特徴とする波長多重型モード同期レーザ装置。

【請求項10】 請求項2に記載の波長多重型モード同期レーザ装置において、

波長分散手段は、所定の波長で零分散を示す単一モード光ファイバであるとともに、光結合手段、光増幅手段、光路差付手段のそれぞれに含まれる波長分散特性を有する媒質の少なくとも一部を含む構成であることを特徴とする波長多重型モード同期レーザ装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は、複数の波長で高速の光パルス列を同時に発生させる波長多重型モード同期レーザ装置に関する。なお、本発明の波長多重型モード同期レーザ装置は、複数の波長を多重して光ファイバを伝送させる光周波数多重伝送方式や、波長差を利用して計測を行う装置に使用される波長多重型の高速パルスレーザ装置に利用される。

【0002】

【従来の技術】従来の波長多重型のレーザ装置は、基本的には独立した複数のレーザ共振器を集積化した構成であり、例えばアレイ型の分布帰還型半導体レーザ(DFB・LD)が開発されている。しかし、分布帰還型半導体レーザの場合には、異なる波長で発振させるために回折格子のピッチ(単位長当たりの溝数)を変える必要があり、製作が困難なために製造歩留りも極めて悪かった。また、半導体レーザ固有の問題点として、発振波長の制御が難しく波長の変動が避けられない問題があった。また、半導体レーザからの出力光を光ファイバに結合することも容易ではない上に、アレイ型の複数の半導体レーザから1本の光ファイバに効率良く結合することは極めて困難な状況にあった。さらに、半導体レーザは注入電流によって直接変調できる特徴があるものの、アレイ型の半導体レーザではチャネル間のクロストークが避けられなかった。

【0003】一方、従来のモード同期レーザ装置は発振波長が1つに限られており、本発明の狙いである複数の波長で同時に発振するものはなかった。ここで、図12を参照して、従来のリング共振器型モード同期レーザの動作原理について説明する。図12(1)は従来のリング共振器型モード同期レーザの基本構成を示すブロック図であり、(2)はモード同期で得られる代表的なスペクトル特性を示す図であり、(3)はその時間波形特性を示す図である。

【0004】図12(1)において、光増幅手段10と光の損失あるいは位相を所定の周波数で変調する光変調器30が光結合手段(例えば、光ファイバ)60、～60を介してリング状に結合され、リング共振器が構成される。なお、図では光結合手段60、と光結合手段60との間に光分岐器20が挿入され、リング共振器内の光パルスが外部に取り出される構成である。

【0005】ここで、リング共振器の光路長Lは、リング共振器を構成する各媒質の物理長をhと屈折率をnとすると、 $L = \sum h_i n_i$ で定義され、それぞれの物理長 h_i にそれぞれの屈折率 n_i を乗じた値(それぞれの光路長)の和である。

【0006】さて、リング共振器では、図12(2)に示すように、 $f_r = c/L$ (ただし、cは光速)で与えられる周波数間隔をもつ多数の縦モードが存在する。ここで、リング共振器内の光変調器30で周波数 $f_m = f_r$ の光変調を加えると、周波数間隔 f_r のすべての縦モードの位相が揃うモード同期発振状態となり、図12(3)に示すように繰り返し周期 $1/f_r$ の光パルス列が得られる。なお、パルス幅は、多数の縦モードスペクトルの包絡線で定まる発振スペクトル幅 $\Delta\nu$ の逆数に対応し、このスペクトル包絡線の中心が中心波長(周波数 ν_0)となる。

【0007】すなわち、モード同期における縦モード発振は、繰り返しパルス列のフーリエ変換で定義される側

帯波スペクトルであり、スペクトル全体で1つの光パルス列が形成されるのであって、複数の波長の光パルス列が同時に発生しているものではない。なお、変調周波数を $f_m = k \times f_r$ (ただし、kは1以上の整数)とし、 f_r の整数倍で動作させる倍数モード同期についても実現できるが、これは繰り返し周波数がk倍されるだけであって、パルス幅およびスペクトル幅は変わらない。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】複数の波長の光パルス列を同時に発生させることができる従来のレーザ装置は、上述したように構成が複雑であるとともに、光ファイバとの結合を効率よく行うことが難しく、また発振波長の制御も容易ではなかった。

【0009】本発明は、新しい原理に基づき、構成および光ファイバとの結合が極めて簡単であるとともに発振波長の制御も可能とした上で、複数の波長で高速の光パルス列を同時に発生させることができる波長多重モード同期レーザ装置を提供することを目的とする。

【0010】

【課題を解決するための手段】請求項1に記載の発明は、光の損失あるいは位相を所定の周波数で変調する光変調手段と、変調された光パルスを増幅する光増幅手段と、前記光パルスを外部に取り出す光分岐手段と、前記各手段を互いに光学的に結合し、所定の長さのリング状の光路を有するリング共振器を形成する光結合手段とを備えたリング共振器型モード同期レーザ装置において、前記リング共振器内に、互いに直交する偏光方向によって異なる屈折率を与え、各屈折率に応じて形成される複数の光路長に対応した共振器を構成する光路差付与手段と、波長によって異なる屈折率を与える波長分散手段とを備えたことを特徴とする。

【0011】請求項2に記載の発明は、光の損失あるいは位相を所定の周波数で変調する光変調手段と、変調された光パルスを増幅する光増幅手段と、入射光の大部分を反射させる2つの光反射手段と、前記2つの光反射手段を両端に配置し、その間に前記光変調手段および光増幅手段を配置して光学的に結合し、所定の長さの往復光路を有するファブリペロ型共振器を形成する光結合手段とを備えたファブリペロ型モード同期レーザ装置において、前記ファブリペロ型共振器内に、互いに直交する偏光方向によって異なる屈折率を与え、各屈折率に応じて形成される複数の光路長に対応した共振器を構成する光路差付与手段と、波長によって異なる屈折率を与える波長分散手段とを備えたことを特徴とする。

【0012】請求項3に記載の発明は、請求項1または請求項2に記載の波長多重モード同期レーザ装置において、光路差付与手段で各屈折率に応じて形成される複数の光路長 $L_1 \sim L_k$ (kは2以上の整数)と、光増幅手段の利得スペクトル幅に入る複数の波長 $\lambda_1 \sim \lambda_m$ (mは2以上k以下の整数)との間で、波長 λ_i におけるi番

目の光路長を $L_1(\lambda_1)$ としたときに、波長分散手段によって異なる波長における光路長が等しくなる条件である $L_1(\lambda_1)=L_2(\lambda_2)=\dots=L_m(\lambda_m)$ を満たす構成であることを特徴とする。

【0013】請求項4に記載の発明は、請求項3に記載の波長多重モード同期レーザ装置において、 $L_1(\lambda_1)=L_2(\lambda_2)=\dots=L_m(\lambda_m)$ を満たす m 個の共振器は、対応する光路長における光増幅手段の利得とそれぞれの共振器損失との差である共振器利得がそれぞれ1より大きく、かつそれぞれが等しい構成であることを特徴とする。

【0014】請求項5に記載の発明は、請求項3に記載の波長多重モード同期レーザ装置において、 $L_1(\lambda_1)=L_2(\lambda_2)=\dots=L_m(\lambda_m)$ を満たす波長 $\lambda_1 \sim \lambda_m$ は、互いの波長差が光パルスが有するスペクトル幅よりも大きい構成であることを特徴とする。

【0015】請求項6～8に記載の発明は、請求項1または請求項2に記載の波長多重モード同期レーザ装置において、光路差付手段は、少なくとも1つの複屈折光ファイバあるいは複屈折結晶から構成される複屈折媒質を含むこと、複屈折光ファイバあるいは複屈折結晶から構成される複屈折媒質を複数 N 個含み、その中の $(N-p)$ 個(p は1以上 $(N-1)$ 以下の整数)の複屈折媒質の光学軸の方向を互いに一致あるいは直交して配置し、他の p 個の複屈折媒質の光学軸の方向を $(N-p)$ 個の複屈折媒質の光学軸に対して45度をなすように配置すること、光増幅手段、波長分散手段、光結合手段のそれぞれに含まれる複屈折媒質の少なくとも1つを含む構成であることを特徴とする。

【0016】請求項9に記載の発明は、請求項1に記載の波長多重モード同期レーザ装置において、波長分散手段は、所定の波長で零分散を示す単一モード光ファイバであるとともに、光結合手段、光増幅手段、光分岐手段、光路差付手段のそれぞれに含まれる波長分散特性を有する媒質の少なくとも一部を含む構成であることを特徴とする。

【0017】請求項10に記載の発明は、請求項2に記載の波長多重モード同期レーザ装置において、波長分散手段は、所定の波長で零分散を示す単一モード光ファイバであるとともに、光結合手段、光増幅手段、光路差付手段のそれぞれに含まれる波長分散特性を有する媒質の少なくとも一部を含む構成であることを特徴とする。

【0018】

【作用】本発明の波長多重モード同期レーザ装置は、リング共振器あるいはファブリペロ型共振器内に挿入された光路差付手段(複屈折媒質)により、同一波長に対する複数の異なる光路長が形成され、さらにそれらの共振器内に挿入された波長分散手段により異なる波長において光路長が等しくなるように設定される。したがっ

て、複数の異なる波長でモード同期の共振周波数条件を満たすことができ、見かけ上1つのモード同期レーザを用いて複数の波長で同時発振させることができる(請求項1～5)。

【0019】なお、光路差付手段として複数の複屈折媒質を用いる場合に、一部の複屈折媒質の光学軸の方向を他の複屈折媒質の光学軸の方向に対して45度をなすように配置することにより、3以上の光路長を有する共振器を構成することができ、多波長発振が可能になる(請求項7)。

【0020】また、光路差付手段は、複屈折媒質を単体で共振器内に挿入してもよいし、光増幅手段、波長分散手段、光結合手段のそれぞれに含まれる複屈折媒質を利用してもよい(請求項6, 8)。

【0021】また、波長分散手段は、単一モード光ファイバのように波長分散特性を有する媒質を集中的な機能部品として単体で共振器内に挿入してもよいし、光結合手段、光増幅手段、光分岐手段、光路差付手段のそれぞれに含まれる波長分散特性を有する媒質を利用して分散配置する構成としてもよい(請求項9, 10)。

【0022】

【実施例】図1は、請求項1に記載の波長多重モード同期レーザ装置の実施例構成を示すブロック図である。なお、本実施例は、リング共振器型モード同期レーザに適用したものである。

【0023】図において、光増幅手段10と、光変調器30と、光路差付手段40と、波長分散手段50とが光結合手段(例えば、光ファイバ等の導波路や空間)60、～60。を介してリング状に光学的に結合され、所定の光路長を有するリング共振器が構成される。なお、図では光結合手段60、と光結合手段60。との間に光分岐器20が挿入され、右回りのリング共振器内の光パルスが外部に取り出される構成であるが、光パルスが左回りの場合には光分岐器20の挿入位置を光増幅手段10に対して反対側にすればよい。また、リング共振器を構成する各部の配置位置は、本実施例に限定されるものではない。

【0024】本実施例の特徴とするところは、従来のリング共振器型モード同期レーザ(図12)の構成要素に加えて、リング共振器内に光路差付手段40および波長分散手段50を付加する構成にある。ここで、光路差付手段40は、互いに直交する偏光方向(TE偏光およびTM偏光)によって異なる屈折率を与える複屈折を示すものである。また、波長分散手段50は、波長によって異なる屈折率を与えるものであり、ここでは光増幅手段10、光分岐器20および光結合手段60、～60。で使用される屈折率が1でない光ファイバや誘電体材料を等価的に集中させ、それらの部分の屈折率を1として扱って説明を容易にするためのものである。すなわち、リング共振器全体の長さを h としたときに、複屈折

性を示す長さ αh の光路差付与手段40の異常光および常光に対する屈折率を $n_o(\lambda)$ および $n_e(\lambda)$ (ただし、 $n_e(\lambda) > n_o(\lambda)$)とし、長さ βh の波長分散手段50の屈折率を $n(\lambda)$ とすることにより、光結合手段60の長さを無視した場合に光路差付与手段40および波長分散手段50を除く部分(長さ $(1-\alpha-\beta)h$)の屈折率を1として扱うことができる。

【0025】以下、図1および図2を参照して、本実施例のリング共振器型モード同期レーザの動作原理について

$$L_o(\lambda) = \{\alpha n_o(\lambda) + \beta n(\lambda) + (1-\alpha-\beta)\} h \quad \dots(1)$$

$$L_e(\lambda) = \{\alpha n_e(\lambda) + \beta n(\lambda) + (1-\alpha-\beta)\} h \quad \dots(2)$$

となる。

【0027】ここで、モード同期の変調周波数 f_m を常々

$$f_m = \{c/L_o(\lambda_1)\} \times k$$

となる。ただし、 λ_1 は光増幅手段10の利得スペクトル内に入る波長とする。このとき、常光は波長 λ_1 をもつモード同期発振を行う。

【0028】一方、異常光に対しては、 $n_e(\lambda) > n_o(\lambda)$ の条件から $L_e(\lambda_1) > L_o(\lambda_1)$ であるために、波★

$$L_o(\lambda_2) = L_o(\lambda_1) \quad \dots(4)$$

である。ここで、(1)式および(2)式を用いて(4)式を★

$$\alpha n_o(\lambda_2) + \beta n(\lambda_2) = \alpha n_o(\lambda_1) + \beta n(\lambda_1) \quad \dots(5)$$

となる。

$$\alpha B(\lambda_1) = -(\alpha + \beta)(\partial n / \partial \lambda) \Delta \lambda \quad \dots(6)$$

の条件が導かれる。なお、ここでは波長差 $\Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ 、複屈折 $B = n_e - n_o$ とおき、異常光の屈折率 n および波長分散手段50の屈折率 n の波長に対する微分はほぼ等しいと仮定した。

【0030】通常物質では、 $\partial n / \partial \lambda < 0$ であり、 $B > 0$ の場合に λ_1 より大きな波長 λ_2 で(6)式が満たされ、その値は α 、 β 、 B 、 $\partial n / \partial \lambda$ で定まる。ここで、波長 λ_2 が光増幅手段10の利得スペクトル内に入るようにパラメータを選べば、異常光に対しても波長 λ_2 でモード同期発振をさせることができる。したがって、本実施例の構成では、図2(1)に示すように、2つの独立した波長で繰り返し周波数の一致したモード同期パルス列を発生させることができる。ここで、リング共振器内の光変調器30で周波数 $f_m = f_r$ の光変調を加えると、周波数間隔 $k f_r$ のすべての縦モードの位相が揃うモード同期発振状態となり、図2(2)に示すように繰り返し周期 $1/f_r$ の光パルス列が得られる。

【0031】なお、2種類の光パルス列は、図2(2)に示す例では互いに直交する偏光であるが、後述する図11の構成をとることにより一致した偏光にすることもできる。また、以上の説明では、 $n_e(\lambda) > n_o(\lambda)$ を仮定したが、不等号の向きが逆の場合でも同様に説明する★

$$\Delta \lambda = \alpha B(\lambda_1) / \{-(\alpha + \beta)(\partial n / \partial \lambda)\}$$

$$= 0.05 \times 3 \times 10^{-4} / (0.95 \times 1.2 \times 10^{-5})$$

$$\approx 1.32 \text{ (nm)}$$

となる。すなわち、光ファイバを用いたリング共振器で 50 は、光路差付与手段50として全長の5%程度の長さの

★で説明する。図2(1)はモード同期で得られる代表的なスペクトル特性を示す図であり、(2)はその時間波形特性を示す図である。なお、ここでは2波長発振のモード同期レーザを例に説明する。

【0026】図1に示す構成では、物理的に1つのリング共振器であっても、偏光方向による屈折率差(複屈折)のために、実際には2つの光路長が共存する状態となる。すなわち、異常光および常光に対する光路長 $L_o(\lambda)$ および $L_e(\lambda)$ は、

※光で定まる縦モード間隔(整数 k 倍も含める)に合わせてと仮定すると、

$$\dots(3)$$

★長 λ_1 では共振条件(3)式を満たさず、モード同期発振は得られない。しかし、異常光および常光ともに波長分散特性を有するために、異常光でも適当な波長 λ_2 において共振条件を満たすことができる。この条件は、

$$\dots(4)$$

★書き下すと、

$$\dots(5)$$

◆ ◆ 【0029】さらに、この条件を整理すると、

$$\dots(6)$$

★ことができるので、一般に多波長発振が実現される。

【0032】また、2種類の光パルスの波長差 $\Delta \lambda$ の大きさは、図2(1)に示すように、モード同期パルスが有するスペクトル幅 $\delta \lambda$ (ほぼパルス幅に逆比例)より大きい方が望ましい。これは、2つの発振スペクトルが重なると、互いの光周波数の引き込みが生じるので発振が不安定になるためである。また、リング共振器としての利得 $G(>1)$ は、これらの2つの波長でほぼ等しくなるように選んだ方がよい。特に、不均一な広がりにより広がった利得スペクトル幅をもつ増幅媒質を使用すると、互いの波長で利得の打ち消し合いが少なくなり、有効に動作させることができる。光増幅手段10の具体例として後述するエルビウム(Er)その他の希土類をドープした光ファイバがこれに相当する。

【0033】ここで、光路差付与手段40として複屈折物質である偏波保存型バンダ光ファイバを用い、波長分散手段50として通常の光ファイバを用いる具体例について説明する。この場合には、複屈折 B は約 3×10^{-4} であり、波長分散 $\partial n / \partial \lambda$ は $-1.2 \times 10^{-5} \text{ (nm}^{-1})$ である。 $\alpha = 0.05$ とし、リング共振器内は光増幅手段10を含めてほとんど光ファイバで構成されたと仮定する($\beta = 0.9$)と、2種類の光パルスの波長差 $\Delta \lambda$ は、

$$\dots(7)$$

偏波保存型バンド光ファイバを使えば、波長差が約1.3 nmとなる2つの波長でモード同期発振を実現させることができる。実際に、後述するエルビウム(Er)ドープ光ファイバを使用したリング共振器型モード同期レーザ装置では、 α を0.02~0.06の範囲で変えることにより、約0.06 nm~1.7 nmの波長差をもつ2波長の光パルス列が確認できた。

【0034】また、光路差付手段40として用いられる偏波保存型バンド光ファイバに代えて、例えば水晶や方解石その他の複屈折結晶を用いると、複屈折Bが水晶で約 8.5×10^{-3} 、方解石で約0.157と大きいので、偏波保存型バンド光ファイバに比較してそれぞれ約1/28あるいは1/520の長さにすることができる。たとえば、(7)式の条件 $\alpha=0.05$ でリング共振器全体の長さが10 mとすると、偏波保存型バンド光ファイバでは約50 cmの長さとなるが、水晶では約1.8 cm、方解石では約1 mmの長さで同じ動作をさせることができる。

【0035】図3は、請求項2に記載の波長多重型モード同期レーザ装置の実施例構成を示すブロック図である。なお、本実施例は、ファブリペロ型モード同期レーザに適用したものである。

【0036】図において、光増幅手段10と、光変調器30と、光路差付手段40と、波長分散手段50と、両端に配置される反射鏡70₁、70₂が光結合手段(例えば、光ファイバ等の導波路や空間)60₁~60₂を介して光学的に結合され、所定の光路長を有するファブリペロ型共振器が構成される。なお、図では反射鏡70₂からファブリペロ型共振器内の光パルスが外部に取り出される構成である。また、ファブリペロ型共振器を構成する各部の配置位置は、反射鏡70₁、70₂を除いて本実施例に限定されるものではない。

【0037】本実施例の特徴とするところは、従来のファブリペロ型モード同期レーザの構成要素に加えて、ファブリペロ型共振器内に光路差付手段40および波長分散手段50を付加する構成にある。

【0038】なお、本実施例の動作原理については、上述したリング共振器型モード同期レーザの説明において、縦モードの周波数間隔が $f_r = c/2L$ と半分になる他は同様にして説明可能である。すなわち、(6)式を満たす2つの波長で同時にモード同期発振をさせることができる。

【0039】次に、図1に示すリング共振器型モード同期レーザに使用される光増幅手段10の実施例(1)、(2)、(3)について、図4、図5、図6を参照して説明する。図4に示す光増幅手段は、希土類ドープ光ファイバ増幅器の例であり、希土類ドープ光ファイバ11と、この希土類ドープ光ファイバ11に励起光を供給する励起光供給部12と、それらの両端に設けられる光ファイバ付きの光アイソレータ13₁、13₂とにより構成される。励起光供給部12は、励起光を発生する半導

体光源12₁と、半導体光源12₂に電流を供給する電流源12₃と、励起光と共振器からの発振光とを合波して希土類ドープ光ファイバ11に導く2対1波長多重用結合器12₄とにより構成される。

【0040】これらのすべての部品は、光ファイバを用いて接続することが可能であり、光アイソレータの方向性により発振光に対して左端(IN)から右端(OUT)への片方向のみの光パスが形成される。なお、光ファイバ同士の接続には、反射戻り光が極めて少ないスーパーPC光コネクタ、または斜め端面光コネクタ、または光ファイバの接続部を溶融してつなぐスプライスが適当である。また、光アイソレータ13₁、13₂は、偏波無依存型あるいは偏波依存型(直線偏波を透過)のいずれでもよい。また、光パス中の反射レベルが小さい場合には、片方の光アイソレータを省くこともできる。

【0041】ところで、ここに示す励起光供給部12の位置は、発振光の通過する方向に合わせて励起光を入射させる順方向励起構成であるが、その配置は光アイソレータ13₁の左側であっても同様である。また、励起光供給部12は希土類ドープ光ファイバ11のすぐ右側に配置し、発振光の通過する方向と逆方向に励起光を入射させる逆方向励起構成でもよい。さらに、順方向と逆方向の励起光を併用する構成をとり、励起パワーを高めることも可能である。また、このような希土類ドープ光ファイバ増幅器を複数個直列に接続して利得や出力パワーを上げることも可能である。

【0042】なお、希土類ドープ光ファイバ11が比較的長い場合は、図1に示す波長分散手段50の一部を兼ねることも可能である。また、希土類ドープ光ファイバ11が偏波保存型であれば、光路差付手段40の一部あるいは全部を兼ねることもできる。

【0043】希土類ドープ光ファイバ11の具体例としては、エルビウム(Er)をドープした数m~100mの長さの石英系光ファイバを使用することができる。また、アルミニウムを同時にドープして利得幅を広げたものでもよい。このようなエルビウムドープ光ファイバは波長が1.53~1.56 μ mの範囲で利得があるので、この波長帯で複数の波長の光を同時に発振させることができる。なお、エルビウムイオンを光励起するのに適した波長は、1.46~1.49 μ mあるいは0.97~0.99 μ mであるが、この両波長の光を発する半導体レーザはすでに開発されている。また、エルビウム以外の希土類元素(例えば、ネオディミウム(Nd)やプラセオディミウム(Pr))をドープした光ファイバを使用した場合には、他の波長の光励起によって1.3 μ mや他の波長の光を発振させることができる。

【0044】図5に示す光増幅手段は、両端に光ファイバを備えた進行波型(TW)の半導体レーザ(LD)増幅器モジュールの例であり、端面の反射防止膜コート、斜め端面あるいは端面窓構造によって実現される端面の

反射率をほぼ零にした半導体レーザチップ14と、半導体レーザチップ14に電流を供給する電流源15と、半導体レーザチップ14と光ファイバとの光結合を行うレンズ結合部16₁、16₂と、レンズ結合部16₁、16₂と光ファイバとの間に挿入される光アイソレータ17₁、17₂とにより構成される。このような構成では、電流源15を直接変調する構成をとることにより、図1、図3に示す光変調器30の役割を兼ねることもできる。

【0045】なお、光アイソレータ17₁、17₂は、図4に示すような光ファイバ付きの光アイソレータであってもよい。また、レンズ結合部16₁、16₂は、1枚のレンズ系に限られるものではなく、焦点距離の異なる2枚以上のレンズを組み合わせた共焦点レンズ系、擬似焦点レンズ系あるいはテーパ先球光ファイバでもよい。ただし、半導体レーザチップ14の端面、レンズ結合部16₁、16₂、光アイソレータ17₁、17₂および光ファイバの端面からの反射戻り光を抑圧する必要があり、斜め端面の採用や反射防止膜のコーティングが有効となる。

【0046】図6に示す光増幅手段は、光ファイバラマン増幅器の例であり、光ファイバラマン増幅部18と、この光ファイバラマン増幅部18に励起光を供給する励起光供給部12と、片方向の光パスを決める光アイソレータ13、とにより構成される。励起光供給部12は、図4に示すものと同様である。

【0047】励起光の波長は、発振光に対して短波長にラマンシフト量だけシフトさせる（石英系光ファイバでは1.55μmに対して1.47μmでよい）。光ファイバラマン増幅部18には、通常の石英系光ファイバを使用するか、あるいはゲルマニウム（Ge）を高ドープして単位長当たりの利得を改善したゲルマニウム光ファイバを使用する。なお、光ファイバラマン増幅部18は比較的に長い光ファイバを用いるので、図1に示す波長分散手段50の一部を兼ねることも可能である。また、偏波保存型の光ファイバラマン増幅部18に対して直交偏波による光励起を行うと、光路差付与手段40の一部あるいは全部を兼ねることもできる。

【0048】図4および図6に示す2対1波長多重用結合器12は、波長差が50nm以上と大きいので、誘電体多層膜による光ファイバ、あるいは2本の単一モード光ファイバを束ねて側面を融着延伸した光ファイバカップラ、あるいは回折格子その他が使用できる。特に、光ファイバカップラは、光ファイバに閉じ込めたまま合波できるので、他の方法に比べて内部反射が少ない。

【0049】次に、図3に示すファブリペロ型モード同期レーザに使用される光増幅手段10の実施例について説明する。ファブリペロ型モード同期レーザでは往復の*

*光パスを確保するために、図4～図6に示す構成から光アイソレータを省いた構成の光増幅手段が用いられる。その他の要求条件は上述したものとほぼ同じであるが、ファブリペロ型共振器内の不要な反射で生じる自励発振を抑圧するために、光変調器30、光結合手段60₁～60₂、光路差付与手段40および波長分散手段50において内部反射をできるだけ抑圧する必要がある。したがって、光パス中には垂直端面がないようにすると、光ファイバ同士の接続には融着法を採用することが有効である。

【0050】次に、図1および図3に示す光変調器30の実施例について説明する。光変調器30の一例としては、電気光学効果を利用したマッハツェッタ型LiNbO₃光強度変調器、方向性結合型LiNbO₃光強度変調器その他が利用できる。また、MQW構造のInGaAsP材料の電気光学効果や吸収端の電圧依存性を利用した光変調器も使用できる。なお、これらの光変調器には偏波依存性を有するタイプが多いが、その場合には入射偏光を変調の加わる偏光方向に一致させれば問題はない。特に、この偏光方向に一致させて偏波保存型光ファイバが接続されている場合には、この光ファイバの複屈折の主軸に入射光の偏光を合わせればよい。光変調器30に加える変調波形は、周波数f_mが高速繰り返しの場合は正弦波でもよいが、低速の場合には矩形波が望ましい。

【0051】次に、図1および図3に示す光路差付与手段40において、2種類の光路差を付与する原理構成と条件について、図7を参照して説明する。光路差付与手段40は、長さがαh、複屈折Bがn₁-n₂の1つの複屈折媒質で構成される。たとえば、図に示すようにy軸を光学軸の方向（屈折率がn₁となる異常光の偏波方向）としてy偏波E_yがこれを通過すると、その光路長はαh n₁となり、x偏波E_xに対してはαh n₂となり、両偏波の光路差はαh Bとなる。すなわち、共振器の光路差はx偏波とy偏波との間で生じる。したがって、2種類の光路をもつ共振器を構成するためには、両偏波がほぼ等しい強度で複屈折媒質に入力され、出力された両偏波ともにその偏波方向が入れ替わらないようにして再入力されなければならない。なお、複屈折媒質としては、上述したように偏波保存型バンド光ファイバの他に水晶や方解石が用いられる。

【0052】ここで、図8に示すように、複数の複屈折媒質（各々の長さがα_{j1}h、α_{j2}h、…、α_{jN}h、各複屈折がB_{j1}、B_{j2}、…、B_{jN}）で構成される場合においても、以下の条件では1つの複屈折媒質と見なすことができる。すなわち、各々の光学軸の方向が1番目の光学軸に対して、平行（0度）か直交（90度）の場合である。このとき、(6)式の波長決定の条件式は、左辺を

$$\alpha B = \alpha_{j1} B_{j1} \pm \alpha_{j2} B_{j2} \pm \dots \pm \alpha_{jN} B_{jN} = \alpha_j B_{j, \text{eff}} \quad \dots(9)$$

とおき、右辺のαを

$$\alpha = \alpha_j = \alpha_{j1} + \alpha_{j2} + \dots + \alpha_{jn}$$

とした式となる。ここで、複合記号±は符号+が0度の場合であり、符号-が90度の場合である。

【0053】以上の関係により、複屈折媒質の全長は個々の長さの和と等しいが、等価的な複屈折 $B_{j, \text{eff}}$ は、個々の値を同じ B としても、長さの比と光学軸の向き(0度, 90度)を適当に選ぶことにより、 $0 \leq B_{j, \text{eff}} \leq B$ となる範囲をとることができる。すなわち、与えられた α (複屈折媒質の全長)において、複屈折が B 以下の任意の値を選択できるので、それに応じて波長差を自由

に設定することができる。
【0054】次に、光路差付与手段40において、3種類以上の光路差を付与する原理構成と条件について、図9を参照して説明する。光路差付与手段40は、図7あるいは図8で与えられる複屈折媒質を基本単位(長さ α , h , 複屈折 $B_{j, \text{eff}}$)として、図9(1)に示すように2単位以上を配置して構成される。このとき、各単位の光学軸方向は、隣同士がほぼ±45度をなすように配置される。なお、隣同士の光学軸が平行または直交する場合には、図8で説明したように、それらを合わせたものが

1単位となる。
【0055】ここで、4つの光路差を付与する場合には、 $\alpha_1 B_{1, \text{eff}} = 2 \alpha_2 B_{2, \text{eff}}$ をほぼ満たす2組の単位(2段構成)で実現可能である。なお、この順番は入れ替えてもよい。

【0056】図9(2)は、偏波方向によって光路差の生*

$$L_1(\lambda_1) = L_2(\lambda_2) = \dots = L_m(\lambda_m)$$

にすることができる。ただし、 $2 \leq m \leq k$ である。ここで、 $\lambda_1 \sim \lambda_m$ が利得媒質の利得幅以内に入れば、複数の波長でモード同期発振させることができる。

【0058】以上説明したように、複数の複屈折物質を用い、さらに隣接する光学軸がほぼ±45度をなすように配置した光路差付与手段40を用いることにより、多数の異なった光路差を実現することができる。また、この目的には共振器を構成するすべての複屈折要素が利用できる。たとえば、光増幅手段10の複屈折(図4, 図6の例で偏波保存型バンド光ファイバを使用した場合や、図5の例で半導体レーザチップの複屈折)や、光結合手段60に偏波保存型バンド光ファイバを使用すればその複屈折も利用できる。そのとき、隣接する複屈折物質との接続条件により、対応する数の異なった光路差を実現することができる。

【0059】次に、図7～図9で説明した光路差付与手段40が共振器として有効に作用する条件について説明する。まず、図9(2)に示した1段目出力を利用する2種類の光路を有する共振器について考察する。

【0060】この場合には、 $n_1 > n_2$ と仮定すると、異常光 E_y は長い光路 L_1 に対応し、常光 E_x は短い光路 L_2 に対応する。これらが共振器を形成するには、異常光 E_y および常光 E_x ともに、共振器を1周あるいは

…(10)

*じる様子を模式的に示す図である。図において、横軸は光路長の相対的な差を表す。1段目の光学軸(主軸)を y 軸としたときに、 y 偏波 E_y および x 偏波 E_x が入射されると、1段目の後では y 偏波 E_y の光路長が x 偏波 E_x の光路長よりも $\Delta L (= \alpha_1 h B_{1, \text{eff}})$ だけ長くなる。次に、 y 偏波 E_y あるいは x 偏波 E_x は、2段目の光学軸(y' 軸)と45度あるいは-45度をなすので、2段目を通過すると各々 y' 偏波成分($E_{yy'}$, $E_{xy'}$)と、これに直交する x' 偏波成分($E_{yx'}$, $E_{xx'}$)とに分かれる。 y' 偏波成分と x' 偏波成分の光路長の差は $\Delta L/2$ であるので、図に示すように、互いの光路差が $\Delta L/2$ と等しい4種類の成分(光路長が小さい順に $E_{xx'}$, $E_{xy'}$, $E_{yx'}$, $E_{yy'}$)ができる。この原理によれば、 k 段で 2^k 種類の光路差を形成することができる。なお、 2^k 種類以外の光路差については、図8で説明したように、 $\alpha_j h B_{j, \text{eff}}$ の条件を選べば可能である。たとえば、 $\alpha_1 B_{1, \text{eff}} = \alpha_2 B_{2, \text{eff}}$ とすると、 $E_{xy'}$ と $E_{yx'}$ が一致するので、3種類の光路差が実現される。

【0057】このように構成される複屈折物質では、 T 偏光および TM 偏光に2分された個々の偏光が次々と2分され、 2^k 種類の光路差が形成されるが、それらを $L_1 \sim L_k$ とすれば、上述した2種類の場合と同様に波長分散を使って

…(11)

1往復したときに同じ利得(損失も含む)を受け、出力と同じ偏波方向 E_y , E_x として再入力されなければならない。たとえば、異常光 E_y と常光 E_x が入れ替わって再入力された場合には、1周目と2周目とを合わせると、両偏波とも $L_1 + L_2$ と同じになり、光路差の異なる共振器が形成されない。

【0061】再入力の具体的な条件は、以下の2つである。①出力された x 偏波および y 偏波ともそのまま共振器内に保持させて再入力すること、②出力された x 偏波と y 偏波を x 軸と±45度をなす1つの直線偏波で切り出し、それを x 軸と±45度をなすように再入力することである。

【0062】条件①は、利得や光変調手段などが偏波に依存せず、共振器が任意の偏波でモード同期発振できる場合のみ適用される。なお、条件①では付加的な損失が加わらないのに対して、条件②では原理的に3dBの損失が加わる。

【0063】図10は、条件①に基づいて2種類の光路長を与えるリング共振器の構成法を説明する図である。なお、ここでは、理解を容易にするためにリング共振器を構成する各部品は省略し、偏波状態の様子のみについて示す。

【0064】図10(1)は、光路差付与手段40以外は

複屈折のない(極めて少ない)物質、例えば通常の真円形光ファイバを用いた場合であり、曲げ等で偏波が保持されない場合には偏波制御器(1/2波長板と1/4波長板の組み合わせ)81を備えて、再入力部の偏波状態を制御して合わせる構成になっている。

【0065】図10(2)は、すべてが偏波保存性のある部品(例えば偏波保存型バンド光ファイバ)を用いた場合であり、光路差付与手段40の出力部および入力部ともに、その光学軸方向に合わせて光ファイバの主軸(n_x, n_y の方向)を配置する構成である。ただし、この場合には、光路差付与手段40と接続される外部の偏波保存型バンド光ファイバでも光路差が加わるので、これを光路差付与手段に加えて設計するか、あるいは図10(2)に示すように、等価的に零(複数の偏波保存型バンド光ファイバを用いて(9)式を零にする条件、例えば同一長の偏波保存型バンド光ファイバを速い軸を直交させて接続するような条件)にして使用する必要がある。

【0066】図10(1),(2)に示す共振器内では、どの部分をとっても直交する2つの偏波が共存するので、出力される2波長の光パルス列は常に直交している。また、図10(1),(2)に示す構成を組み合わせることもできる。なお、図10の構成法は、ファブリペロ型共振器の場合にも適用可能である。

【0067】図11は、条件②に基づいて2種類以上の光路長を与えるリング共振器の構成法を説明する図である。条件②は、偏波依存性のある部品(例えば、LN変調器、半導体レーザアンプ、偏波依存性光アイソレータ、偏光子)を用いた共振器で、1つの偏波でしかモード同期発振しない場合に有効な構成法であるが、もちろん偏波依存性のない場合にも適用可能である。

【0068】図において、光路差付与手段40から出射された2つの偏波が最初の偏波依存性のある偏光子91に入射されるとき、偏光子91の主軸と45度をなすように接続し、そこから出射した直線偏波は次の偏波依存性のある部品の主軸と一致させておき、再び光路差付与手段40に入射する所でその入射側の光学軸と45度をなすように構成する。なお、光路差付与手段40の入射側には、図に示すように45度の入射条件を決定するための偏光子93を挿入してもよい。また、図では、光変調器等の入射側に偏波状態を制御する偏波制御器81が備えられる。

【0069】ところで、この構成では、光路差付与手段40と偏光子91との間のみに2つの偏波状態が存在するので、ここに光分岐器20を置くと直交偏波出力が得られるが、それ以外に設置した場合には同一偏波の出力となる。

【0070】なお、この構成法についてもファブリペロ型共振器に適用可能であるが、片側の偏光子を省く場合には、偏光子のある方に偏波依存性のある部品を配置する必要がある。

【0071】次に、図9(2)に示した2段目以降の出力を利用して3種類以上の光路を有する共振器について考察する。図9(2)に示すように、光路差付与手段の出力は2つの直交する直線偏波から構成される。リング共振器の場合において、 E_{yx} 出力を反対側からの再入力の際に E_y になるように偏波方向を回転させるとする。このとき、 E_{yx} は2度目も同じ光路長となって共振器を形成できるが、 E_{yx} に直交する E_{yy} は再入力で E_x 方向になるので、 E_{yy} に対応する共振器は形成できない。同様にして、 E_{xy} は共振条件を満たすが、 E_{xx} は共振条件を満たさない。結局、この構成法では2つの共振条件しか存在せず、3つ以上の波長では発振できない。

【0072】3つ以上の共振条件をリング共振器で実現するには、光路差付与手段40から出力される2つの偏波を反対側から再入力するときに、光路差付与手段の入力側の光学軸に対して45度の偏波方向となるようにすればよい。このようにすれば、各光路差に対応する偏波成分が1周したときに、同じ入力偏波条件となく成分が常に半分は存在するので、3つ以上の波長で発振させることができる。

【0073】具体的方法は、共振器内の部品に偏波依存性がある場合は、図11に示すように光路差付与手段40の入出力段に偏光子91, 93を配置する。すなわち、光路差付与手段40の出力側で出力偏波に対して45度に配置した偏波91で切り出した後に、この直線偏波を保持させたまま光路差付与手段40の入力側に導き、入力側の光学軸と45度をなす直線偏波で戻すようにすればよい。なお、途中の経路で真円光ファイバなどを使って偏波状態が変化した場合には、偏波制御器81を必要に応じて用いて入力側で45度の偏波となるようにする。また、入力側に偏光子93が設置されていれば、偏波を完全に合わせる必要はない。

【0074】なお、図10に示すように共振器内の部品に偏波依存性がない場合には、光路差付与手段40に左側から再入力される偏波状態を45度傾ければよい。また、ファブリペロ型に2段以上の光路差付与手段を挿入する場合には、偏波依存性のある部品を使用したときに上述の偏光子と同様の向きに挿入すればよい。また、光路差付与手段以外が偏波に依存しない場合には、出力偏波がそのまま戻るようにすればよく、必要に応じて偏波制御器を用いればよい。

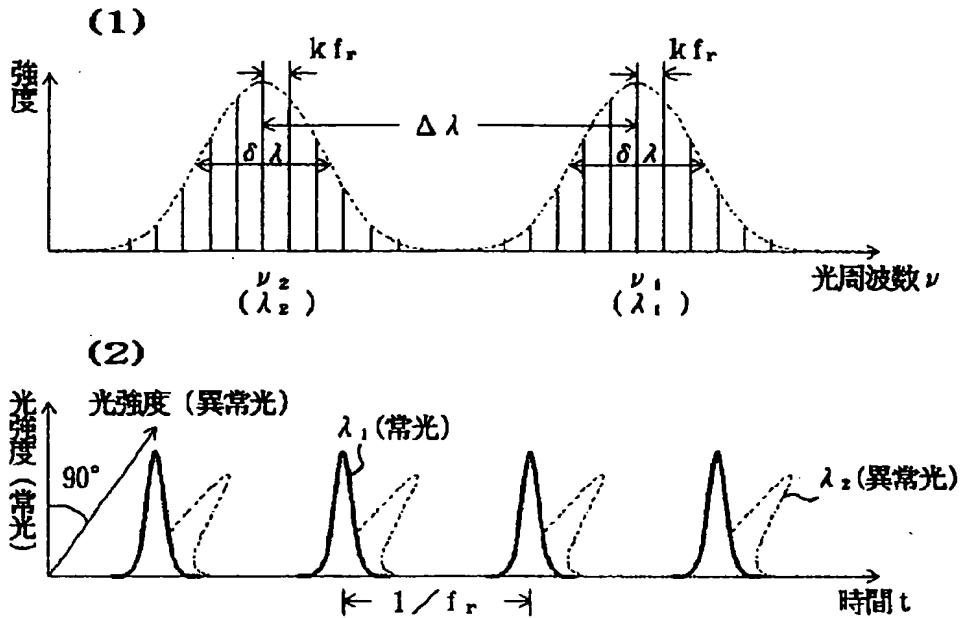
【0075】

【発明の効果】以上説明したように本発明は、物理的には1つの共振器で構成されるモード同期レーザに、光路差付与手段と波長分散手段を所定の条件のもとで付加することにより、繰り返し完全に一致した多波長の高速光パルス列を発生する新しいタイプのレーザ装置を実現することができる。

50 【0076】本発明による波長多重モード同期レーザ

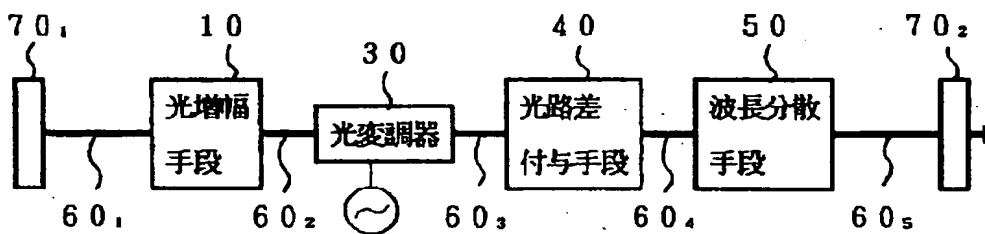
【図2】

請求項1に記載の波長多重型モード同期レーザー装置の動作原理説明図



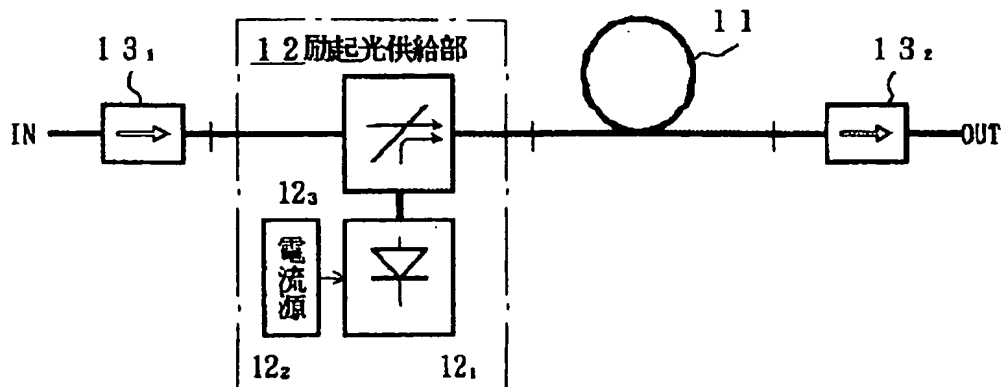
【図3】

請求項2に記載の波長多重型モード同期レーザー装置の実施例構成図



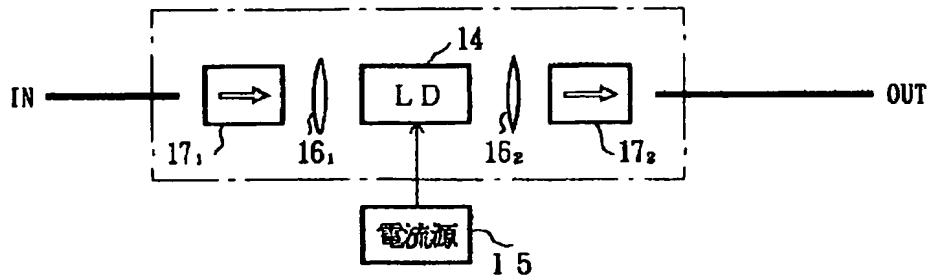
【図4】

光増幅手段10の実施例構成(1)



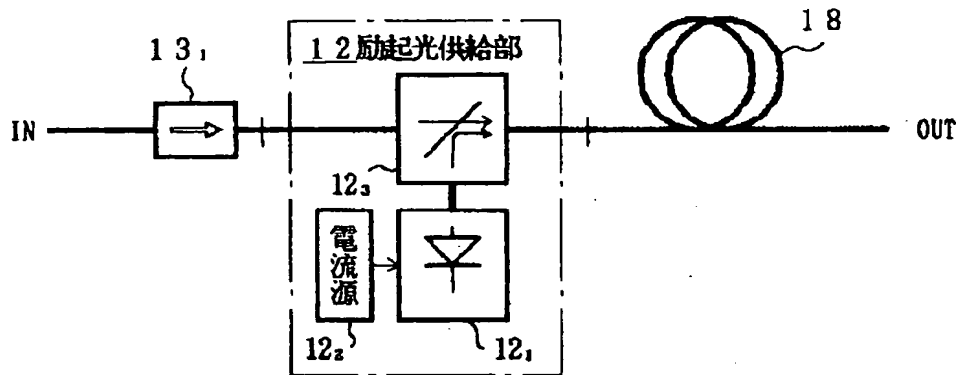
【図5】

光増幅手段10の実施例構成(2)



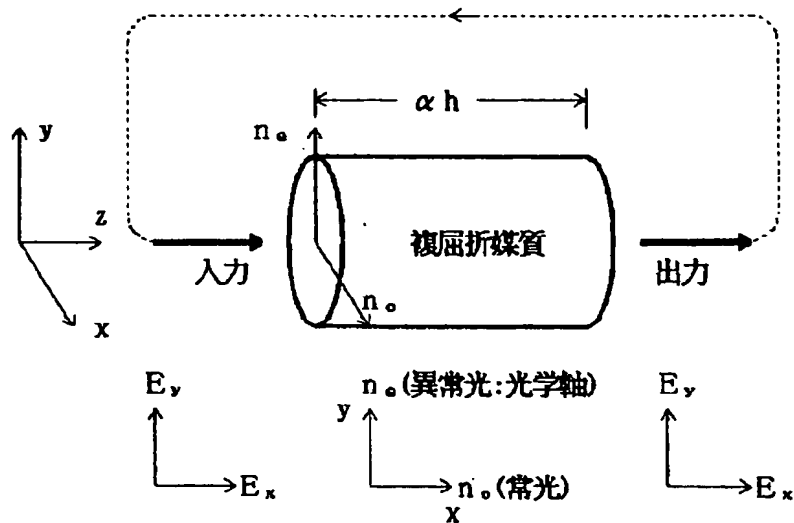
【図6】

光増幅手段10の実施例構成(3)



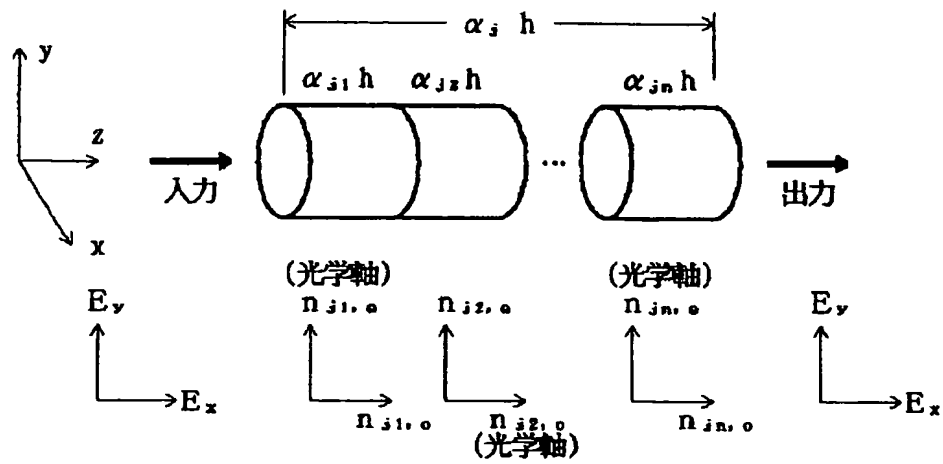
【図7】

2種類の光路差を付与する光路差付与手段40の原理説明図



【図8】

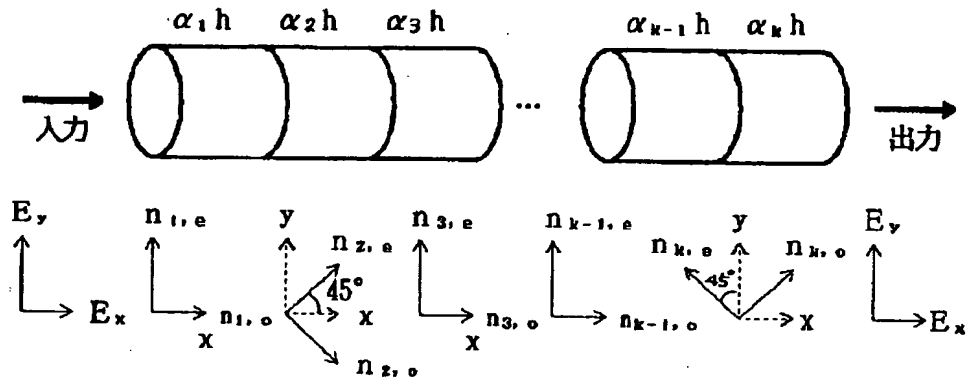
2種類の光路差を付与する光路差付与手段40の原理説明図



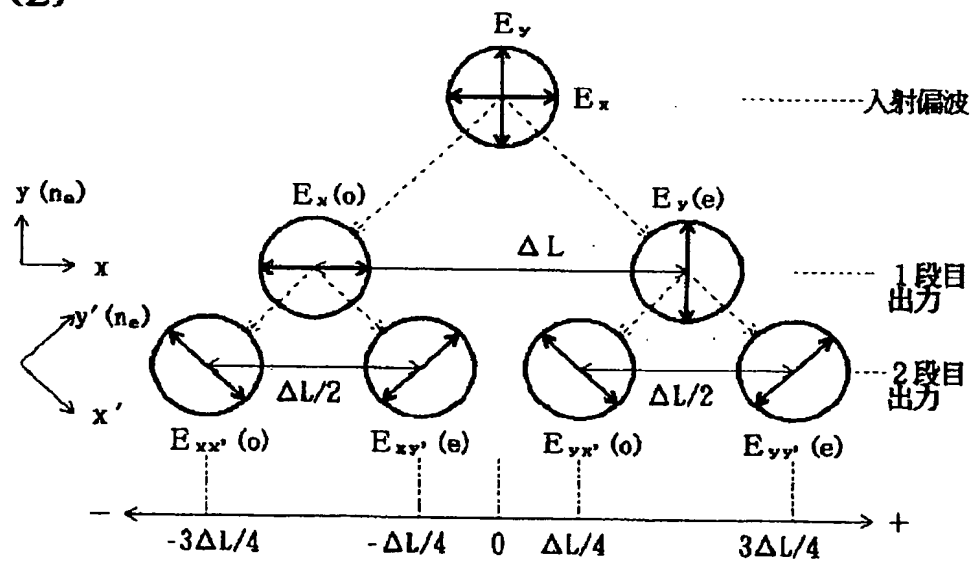
【図9】

3種類以上の光路差を付与する光路差付与手段40の原理説明図

(1)



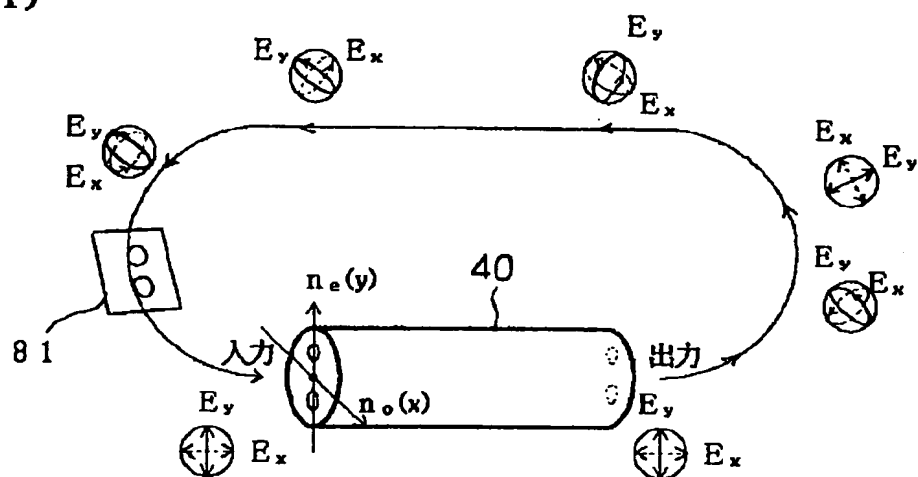
(2)



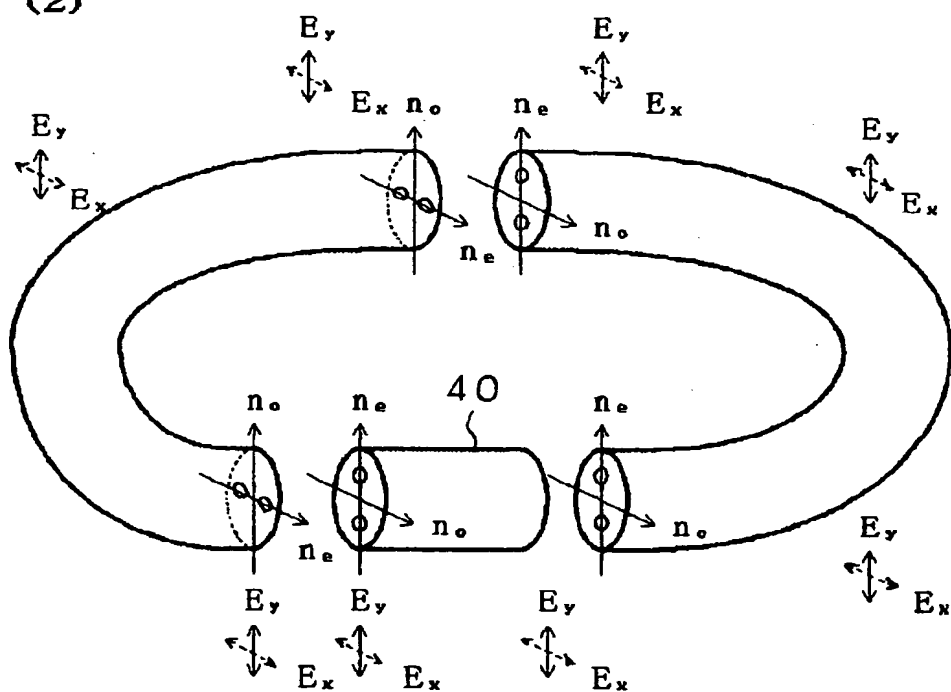
【図10】

2種類の光路長を与えるリング共振器の構成法説明図

(1)

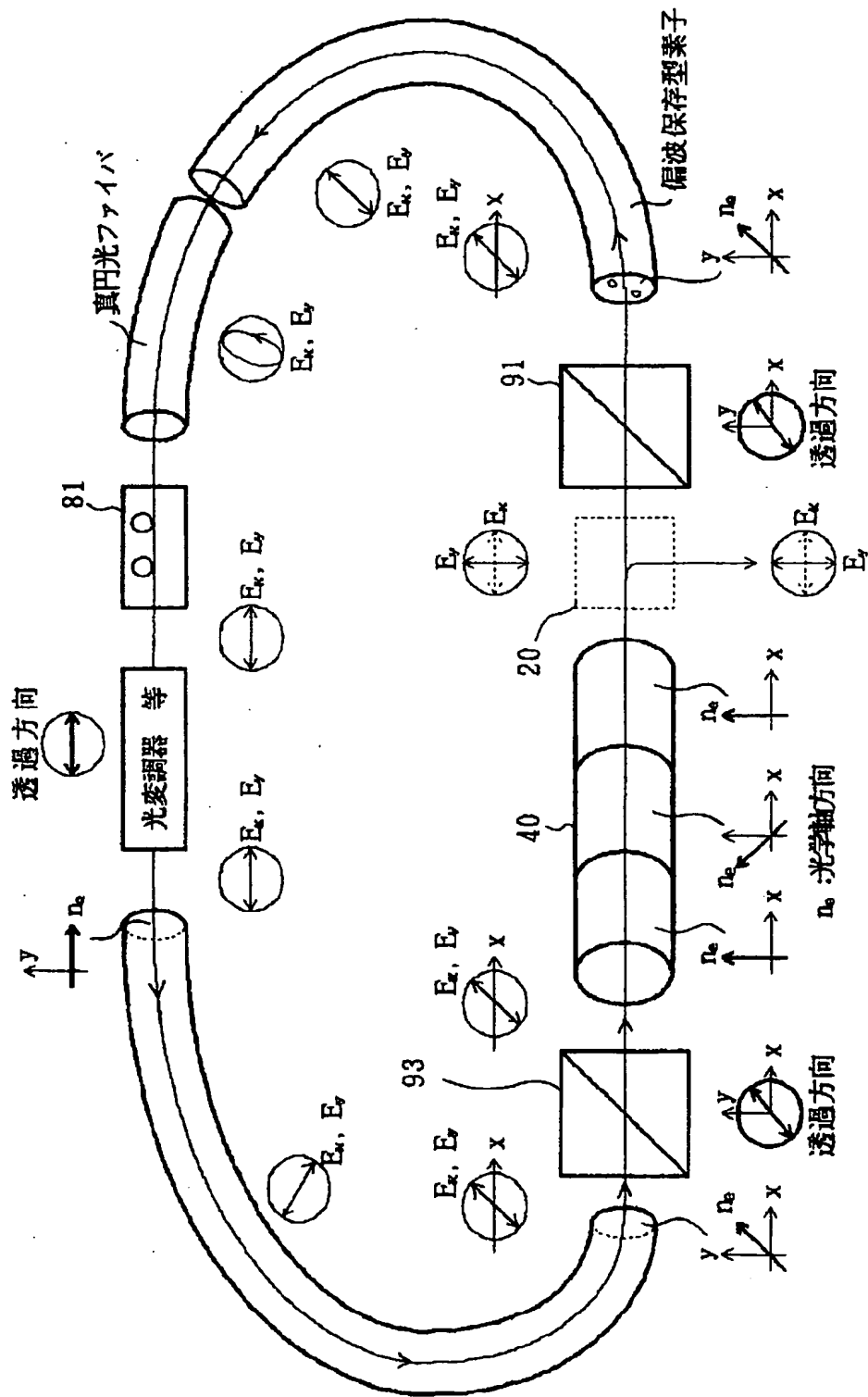


(2)



【図11】

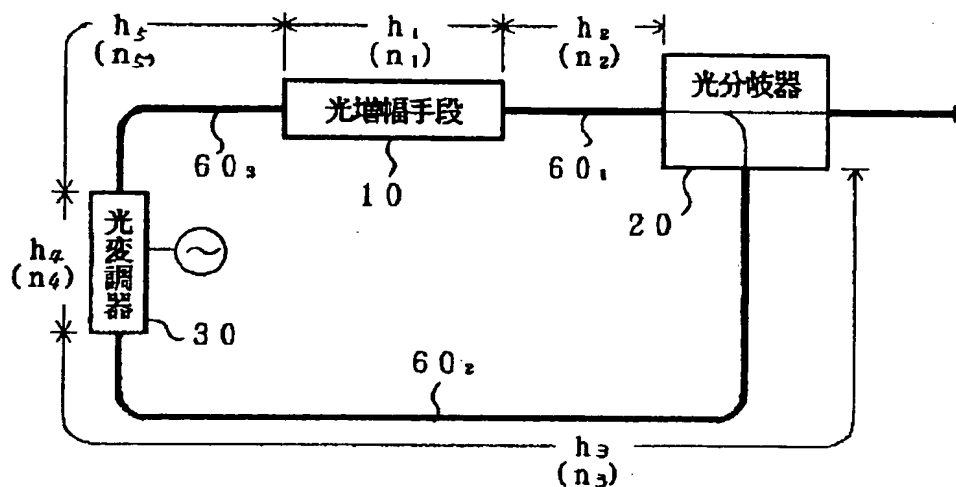
2種類以上の光路長を与えるリング共振器の構成法説明図



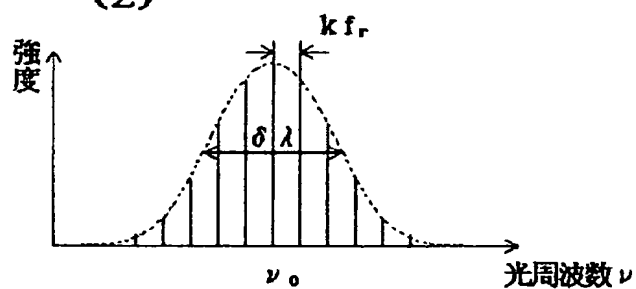
【図12】

従来のモード同期レーザ装置の動作原理説明図

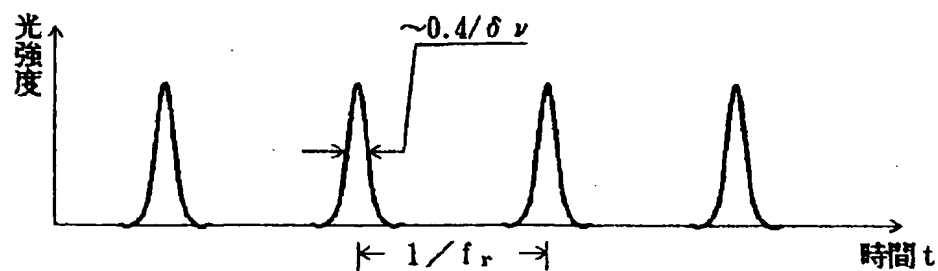
(1)



(2)



(3)



フロントページの続き

(72)発明者 ジョン シュラツガー
 アメリカ合衆国 コロラド州 80304,
 ボールダ #319 フォルソム 2727